文章编号:1000-4939(2024)06-1257-12

考虑土石混合体“颗粒破碎-剪切参数-含水率”相关性的力学特性研究

陈泽亮,许萍,房凌云,林青伟,柳智龙

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室,710048 西安)

摘 要:抽水蓄能电站建设产生大量土石混合料堆积形成弃渣坝,渣体结构松散、级配差、重度大、透水性强,若遇强降雨,将严重影响其安全稳定性。现以弃渣坝土石混合体为研究对象,探究其在不同应力状态下应力-应变发展规律、变形强度特性,以及剪切前后颗粒级配定量研究。试验结果表明:随着含水率增加,混合体试样的抗剪强度降低,应力-应变曲线整体呈现硬化趋势,含水率的增加降低了非线性内摩擦角,黏聚力呈现先减小后增大的趋势;随着试样含水率增大,表征其变形特性的相变应力比减小,体变量减小,剪胀特性影响减弱,随着围压增大,结果与上述一致。通过对混合体剪切前后颗粒级配测定,引入颗粒破碎指标探究土石混合体颗粒破碎-剪切参数-含水率相关性分析,结果表明,当含水率增加且颗粒破碎增大时,抗剪强度减小幅度变大,对坝体的安全影响更为明显;当含水率和破碎程度减小时,结果反之。最后,通过引入破碎参数进行了邓肯-张模型修正,并基于试验结果论证了模型的适用性,以期为后续弃渣坝结构安全稳定提供借鉴。

关键词:抗剪强度;相变应力比;颗粒级配;颗粒破碎;邓肯-张模型修正;土石混合体

中图分类号:TV41 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.004

Study on mechanical properties of soil-rock mixture considering the correlation of “particle breakage-shear parameters-water content”

CHEN Zeliang, XU Ping, FANG Lingyun, LIN Qingwei, LIU Zhilong

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi’an University of Technology, 710048 Xi’an, China)

Abstract: The construction of pumped storage power station produces a large amount of earth-rock mixture to form a waste dam, which has loose structure, poor grading, heavy weight and strong water permeability. If it encounters heavy rainfall, its safety and stability will be seriously affected. Taking the soil-rock mixture of waste dam as the research object, the development law of stress and strain, the characteristics of deformation strength and the quantitative study of particle gradation before and after shearing are explored. The test results show that with the increase of water content, the shear strength of the mixture sample decrea-

收稿日期:2024-02-09 **修回日期**:2024-05-06
基金项目:陕西省自然科学基础研究计划项目(No. 2023-JC-YB-383);陕西省科技创新团队项目(No. 2022TD-01)
通信作者:许萍,副教授。E-mail:xuping1986@xaut.edu.cn
引用格式:陈泽亮,许萍,房凌云,等. 考虑土石混合体“颗粒破碎-剪切参数-含水率”相关性的力学特性研究[J]. 应用力学学报,2024,41(6):1257-1268.
CHEN Zeliang, XU Ping, FANG Lingyun, et al. Study on mechanical properties of soil-rock mixture considering the correlation of “particle breakage-shear parameters-water content”[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(6):1257-1268.

ses, the stress-strain curve shows a hardening trend as a whole, the nonlinear internal friction angle decreases with the increase of water content, and the cohesion first decreases and then increases. With the increase of water content, the phase change stress ratio, the volume variable and the dilatancy effect decrease. With the increase of confining pressure, the results are consistent with the above. By measuring the particle gradation of the mixture before and after shearing, the correlation analysis of particle breakage - shearing parameters-water content of the soil-rock mixture is explored by introducing the breakage index. The results show that when the water content increases and the particle breakage increases, the shear strength decreases greatly, which has a more obvious impact on the safety of the dam. When the water content and breakage degree decrease, the result is the opposite. Finally, the Duncan-Chang model is modified by introducing breakage parameters, and the applicability of the model is demonstrated based on the test results, so as to provide reference for the safety and stability of the follow-up waste dam structure.

Key words: shear strength; phase change stress ratio; particle gradation; particle breakage; Duncan-Chang model modification; earth-rock mixture

抽水蓄能建设开挖过程中产生的大量废渣,主要为土石混合体,结构松散,用其材料堆积形成的弃渣坝,具有迥然不同的物理力学特性,结构稳定性差,遇暴雨洪水等险情时易诱发坝体失稳,造成溃坝,发生滑坡、泥石流等地质灾害,严重危及人民生命财产安全。这些不利因素对弃渣坝变形强度特性影响较大,因此,研究土石混合体的安全稳定性在工程安全中至关重要。

实际工程中,受降雨天气影响,弃渣坝中水量逸出较少,内部的含水量将直接影响到结构稳定。含水量的不同,对材料的抗剪强度将产生显著增强或减弱[1-2]。针对材料内含水量所产生的影响,国内学者[3-5]对不同材料进行了力学特性研究。陶庆东等[6]通过正交试验设计,对不同含石量、含水量、岩石风化程度下土石混合体开展了大型直剪试验,研究其抗剪强度,通过邓肯-张模型拟合曲线与试验结果对比,表明应力-应变曲线近似为非线性双曲线关系;汤华等[7]通过开展三轴试验,研究了不同含水率的应力-应变曲线的硬化现象和对抗剪强度指标的影响; 侯乐乐等[8]通过建立模型模拟,分析了在原状黄土的排水三轴剪切试验,不同含水率在不同围压下对黄土结构破坏和变形特性的影响,及其软化、硬化现象;蔡国庆等[9]对不同含水率、不同干密度的非饱和黄土试样进行直剪试验以研究非饱和黄土的抗剪强度,通过抗剪强度指标分析对抗剪强度的影响,建立了以基质吸力为变量的抗剪强度公式;苗强强等[10]通过不排水不排气三轴剪切试验,对不同含水率在不同围压下进行剪切,得出最优含水率,并对变形特性进行了分析;牛庚等[11]研究非饱和土变形和含水率变化特性,通过三轴剪切试验,得出了土样含水率和体积变化规律;谢宝香等[12]采用大型三轴试验仪对红砂岩粗粒料进行固结不排水剪切试验,分析颗粒剪切前后级配变化对材料力学特性的影响,结果发现,粗颗粒含量越高,颗粒破碎程度越大,颗粒破碎对峰值强度及内摩擦角影响较大。前人研究中涉及较多的单一土或石材料的强度特性以及变形特性,但土石混合体作为一种特殊的地质材料,其物理性质既不同于“土体”,也不同于“岩石”,表现出强烈的非均质性、非连续性和空间变异性。本研究分析了土石混合体的变形强度特性,以及颗粒级配剪切前后的变化,将颗粒破碎与力学特性进行联系。

为详细了解含水率及围压对土石混合体力学特性的影响,以及更为贴合实际情况,开展了一系列大型三轴固结不排水剪切试验。根据试验数据,绘制应力-应变曲线,计算抗剪强度参数,阐述其强度特性,引入相变应力比概念,说明其变形特性。为更好地对力学特性进行量化分析,研究不同含水率剪切前后的颗粒级配变化,同时进行颗粒破碎-剪切参数-含水率相关性的力学特性分析。最后,修正邓肯-张模型,并对应力-应变曲线进行拟合,验证其适用性。

1 土石料大型三轴试验剪切破坏特性试验

1.1 试验材料及方法

土石混合体材料取自西北某抽水蓄能电站建设

过程中产生的弃渣坝填筑料,如图 1 所示,其用于建设西磨沟弃渣场,受地形条件的限制,施工渣体形成几处规模不大的弃渣场,其在现实工况下最大高差小于 100 m,实际围压小于 1 MPa。为研究其力学性能的准确性,在本次三轴试验中试样采用大尺寸,小围压进行分析。土体与块石由大理岩和花岗闪长岩构成,弱风化深度一般大于 15 ~20 m,岩体较完整,裂隙发育一般,表层岩体受力易破碎,试验用料见图 2。试样“含石量”为 52% ,平均比重 G_s 为 2.83,通过四分法取出代表性试样,绘制级配曲线。本试验仪器最大允许粒径为 60 mm,由于试样粒径范围在 0 ~100 mm之间,受试验尺寸限制,因此采用等量替代法对原级配进行缩尺。



图 1　弃渣场施工现场图

Fig. 1　Construction site diagram of the waste disposal site



图 2　试验用料

Fig. 2　Test materials

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50132—2019),等量替代法是指用粒径小于仪器允许最大粒径并大于 5 mm 的土粒按比例等质量替换超粒径颗粒,目的是通过控制细料含量来使缩尺料的力学性质最大程度上与原级配料保持一致。试验所得级配参数如表 1 所示,缩尺前后级配曲线如图 3 所示。

本试验采用非饱和弃渣土石混合体三轴剪切试验,根据弃渣坝典型渣场现场取样,发现不同位置处的含水率存在较大差异,变化区间约为 9% ~12% 之间,平均天然含水率为 10% 。为探讨不同含水率对弃渣坝强度变形影响,从而为弃渣坝安全稳定提供参考,确定试验含水率为 5 组,分别为 4% 、7% 、10% 、13% 、16% ,围压分别为 100、200、400、800 kPa。三轴试验采用大型三轴压缩试验仪(图 4),试样尺寸 Φ300 mm × H600 mm,最大围压 3.0 MPa,最大轴向应力 21 MPa,最大行程 300 mm,剪切速率 0.4 mm/min。

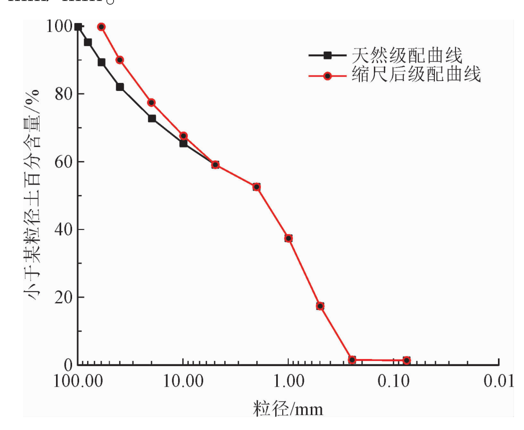


图 3　土石混合体缩尺前后级配曲线

Fig. 3　Grading curve of soil-rock mixture before and after scale reduction



图 4　三轴试验仪

Fig. 4　Triaxial tester

备样阶段根据《土工试验方法标准》(GB/T 50132—2019),首先对现场土石混合料进行级配和含水率测定,对于超粒径块石经等量替代法进行级配缩尺处理,配置试验所需含水率进行试验。按照表 1 土石混合料缩尺后的颗粒级配比例进行不同含水率制样,制样完成后在试验装置中进行装样,开始固结剪切。试验结束后对试样进行风干和筛分处理,绘制剪后级配曲线。通过室内试验,得到土石混合体应力-轴向应变曲线以及抗剪强度参数,通过剪切前后级配变化探究颗粒破碎变化规律。

表 1　土石混合体级配组成

Tab. 1　Grading composition of soil-rock mixture

参数	颗粒大小组成百分比/%						
	100 ~ 80 mm	80 ~ 60 mm	60 ~ 40 mm	40 ~ 20 mm	20 ~ 10 mm	10 ~ 5 mm	<5 mm
天然级配	4.5	6.0	7.3	9.3	7.4	6.2	59.3
缩尺级配	–	–	9.8	12.6	9.9	8.4	59.3

2　试验结果与分析

2.1　应力-应变关系曲线分析

图 5 为不同含水率下的弃渣坝土石混合体三轴试验应力-应变曲线。

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50132—2019)[13],硬化型曲线通常取 15% ~20% 轴向应变所对应的应力作为破坏应力,本试验破坏应力取值对应的轴向应变为 15% 。当含水率一定时,随着围压增大,土石混合体应力-应变曲线越陡峭,破坏应力越大,抗剪强度增大,可以看出,围压对土石混合体应力变形影响较为显著;随着含水率增大,可以明显看出作用不同围压下,抗剪强度呈现减小趋势,曲线整体呈现硬化趋势。涂义亮等[14]进行了关于土石混合体的直剪试验,将含水率对其应力-变形的影响划分为应变硬化、应变软化和残余变形 3 个阶段,邓华锋等[15]认为不同含水率下,土石混合体试样的破坏模式近似为塑性应变,曲线无明显峰值。

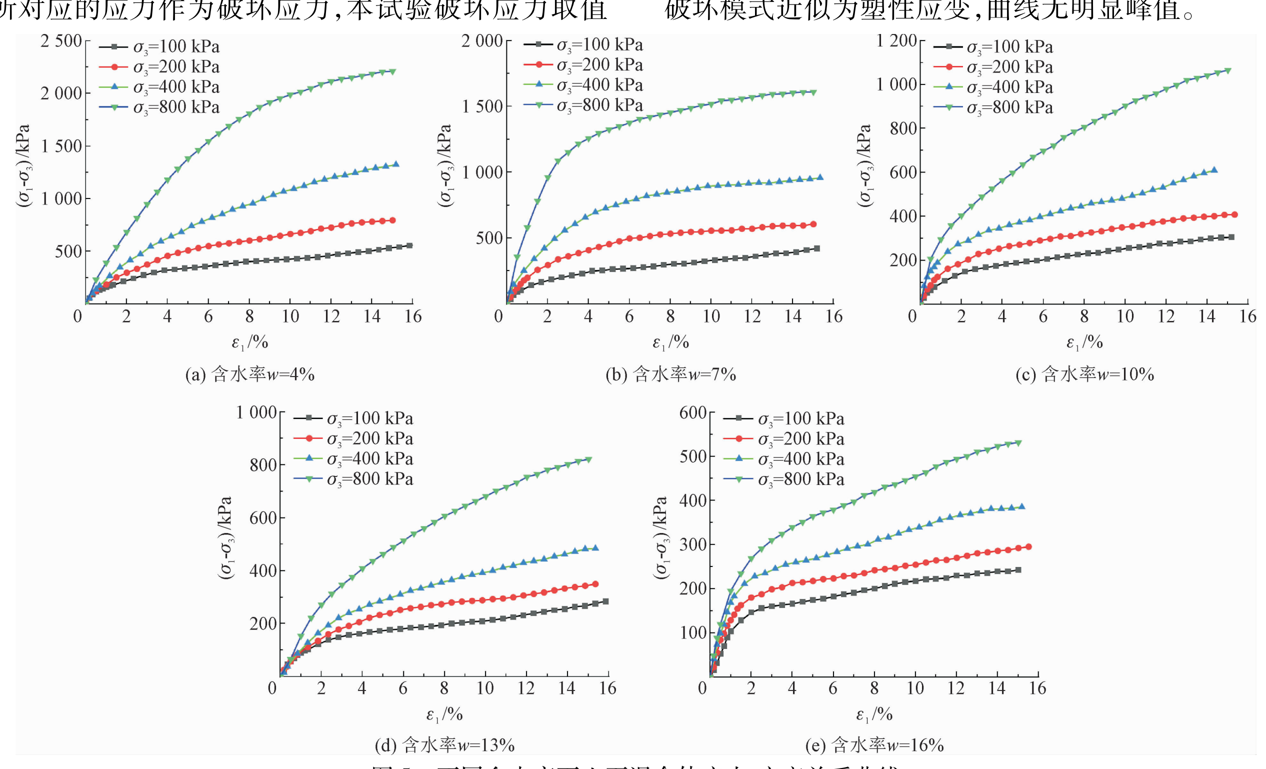


图 5　不同含水率下土石混合体应力-应变关系曲线

Fig. 5　Stress-strain relationship curve of soil-rock mixture under different water content

表 2 为不同含水率下峰值剪应力,可以看出同一围压下,含水率越大,峰值剪应力呈现出一个递减的趋势,但随着含水率增大,峰值剪应力减小幅度减弱,引起这一变化规律的原因是由于水对土石颗粒之间的润滑作用增强,从而导致其抗剪强度减弱。综合表现为高围压条件下,含水率增大,峰值剪应力值减小幅度更为明显,应力-应变曲线变化显著;小围压条件下,含水率对峰值剪应力影响更大,应力-应变曲线变化幅度并不明显。

表 2　不同含水率下峰值剪应力

Tab. 2　Peak shear stress under different water content

w/%	各级压力下峰值剪应力/kPa			
	100	200	400	800
4	543.8	796.1	1 323.8	2 211.4
7	421.3	606.1	958.2	1 611.4
10	305.0	408.4	609.4	1 065.9
13	276.7	349.8	483.9	821.8
16	242.9	292.2	385.2	531.5

2.2　不同含水率对强度特性的影响

对于强度特性的研究,主要是对抗剪强度指标的分析,本研究主要以土石混合体的黏聚力和内摩擦角两个抗剪强度指标反映强度特性。对于抗剪强度指标的求取,常选用线性莫尔-库仑强度准则进行分析。但在高围压条件下土石混合体强度包络线常呈现非线性特征[16],其原因在于受颗粒破碎、剪胀和重排列的影响,应考虑土强度包线的非线性,对内摩擦角进行修正。

采用线性莫尔-库伦强度准则进行求解。库伦提出抗剪强度表达式,即

$$\tau_f = c + \sigma\tan\varphi \tag{1}$$

式中:τ_f为抗剪强度;σ为法向应力;c 为黏聚力;φ 为内摩擦角。黏聚力计算结果如表 3 所示。

内摩擦角采用邓肯-张模型进行修正,以强度包线的非线性表达式进行计算。强度包线的非线性表达式[17]为

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi\lg\frac{\sigma_3}{p_a} \tag{2}$$

将式(2)代入式(1),得到总应力强度特性公式[18]

$$\tau_f = c + \sigma\tan\left(\varphi_0 - \Delta\varphi\lg\frac{\sigma_3}{p_a}\right) \tag{3}$$

式中:φ 为从原点到某一围压莫尔圆的切线斜率对应的倾角;φ_0 为一个大气压下的内摩擦角;$\Delta\varphi$ 为非线性参数,表示 σ_3 增加一个对数周期下的 φ 的减小值;p_a 为大气压强(p_a = 101.3 kPa,量纲与 σ_3 相同)。

平均天然含水率 10% 试样莫尔圆与强度包线如图 6 所示,抗剪强度参数的计算结果如表 3 所示。

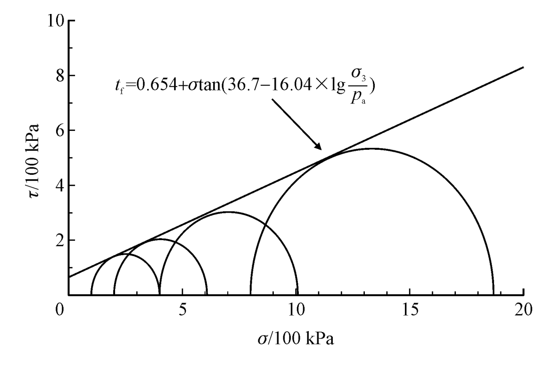


图 6　含水率为 10% 试样莫尔圆及强度包线图

Fig. 6　Mohr circle and strength envelope diagram of samples with water content of 10%

表 3　不同含水率试样抗剪强度参数

Tab. 3　Shear strength parameters of samples with different water contents

w/%	φ_0/(°)	非线性参数 $\Delta\varphi$	c/kPa
4	47.37	13.56	93.2
7	42.81	14.85	80.5
10	36.70	16.04	65.4
13	35.02	18.46	73.4
16	32.89	21.50	88.9

通过求解 5 种含水率试样的抗剪强度参数(表 3),可知,黏聚力随着含水率的增大,先减小后增大,原因是随着含水率增大水膜的存在会减弱颗粒间的接触,从而减小了颗粒间的黏聚力;当含水率持续增大,水分会填充土壤孔隙,形成更多的水桥,这会增加颗粒间的亲水作用,导致黏聚力再次增大。通过表 3 可知,随着含水率增加内摩擦角 φ 呈现下降的趋势,对应的抗剪强度也逐渐减小,与应力应变曲线所体现的结论相符。非线性参数 $\Delta\varphi$ 伴随着含水率的增加而逐渐增大,增大幅度为 58.55%,说明含水率越大对土石混合体的非线性影响越明显。

2.3　不同含水率对变形特性的影响

对于其变形特性,MANZARI 等[19]提出用状态相关的散粒体颗粒料剪胀特性来解释,即用相变应力比 M_{pt} = q/p(式中 q 为临界剪胀应力,p 为平均主应力)表示,通过相变应力比可以很好的反映不同含水率的体积变量,为变形特性提供参考依据。将相变应力比 M_{pt} 与围压 σ_3 两组数据绘制关系曲线(图 7),发现拟合程度良好。

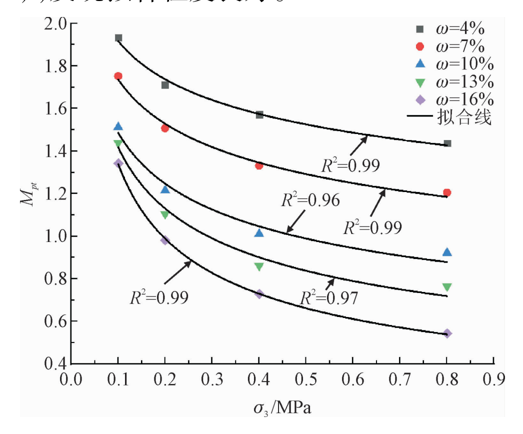


图 7　$M_{pt}-\sigma_3$ 关系曲线

Fig. 7　$M_{pt}-\sigma_3$ relation curve

由图 7 可知,当在一定围压 σ_3 下,随着含水率

的增加,相变应力比 M_{pt} 减小,则体变量减小;在同一含水率条件下,相对应力比 M_{pt} 随着围压 σ_3 的增加而呈现减小的趋势,体变量减小,可以说明在小围压的作用下,会出现剪胀现象,但随着围压的增加,与小围压相比,试样最后由剪胀转化为剪缩,并且会出现剪胀滞后的现象。

3 土石混合体颗粒破碎-剪切参数-含水率相关性分析

3.1 不同含水率下剪切前后颗粒级配变化

土石混合体这一散粒体材料,颗粒破碎是其明显特征,且显著影响其强度、变形特性[20-21]。将不同含水率剪切后得到的试样进行筛分处理,图 8 为不同含水率下剪切前后级配曲线,表 4 为弃渣坝土石混合体剪后筛分结果。

从试验结果看,在同一级配下 5 组不同含水率(4%、7%、10%、13%、16%)的状态下,级配曲线随着含水率的增大而呈现出“缩窄”的趋势。由图 8 可以看出,相较其他含水率,含水率为 4% 时,试样剪切前后颗粒粒径变化最大,含水率为 16% 时,试样剪切前后颗粒粒径变化最小。导致这一现象的原因可以解释为颗粒之间的水破坏了土颗粒之间原有的黏结作用和摩擦,在颗粒之间形成水膜,水膜起到润滑作用,伴随着含水率的增大,水膜越厚,颗粒之间接触面积越小,润滑作用越强,更容易相互滑动,使得颗粒与颗粒之间的作用力减小,最终导致试样抗剪强度减弱,颗粒破碎量减少。同时,由图 8 和表 4 可知,当含水率增加时,细颗粒含量几乎不受影响。

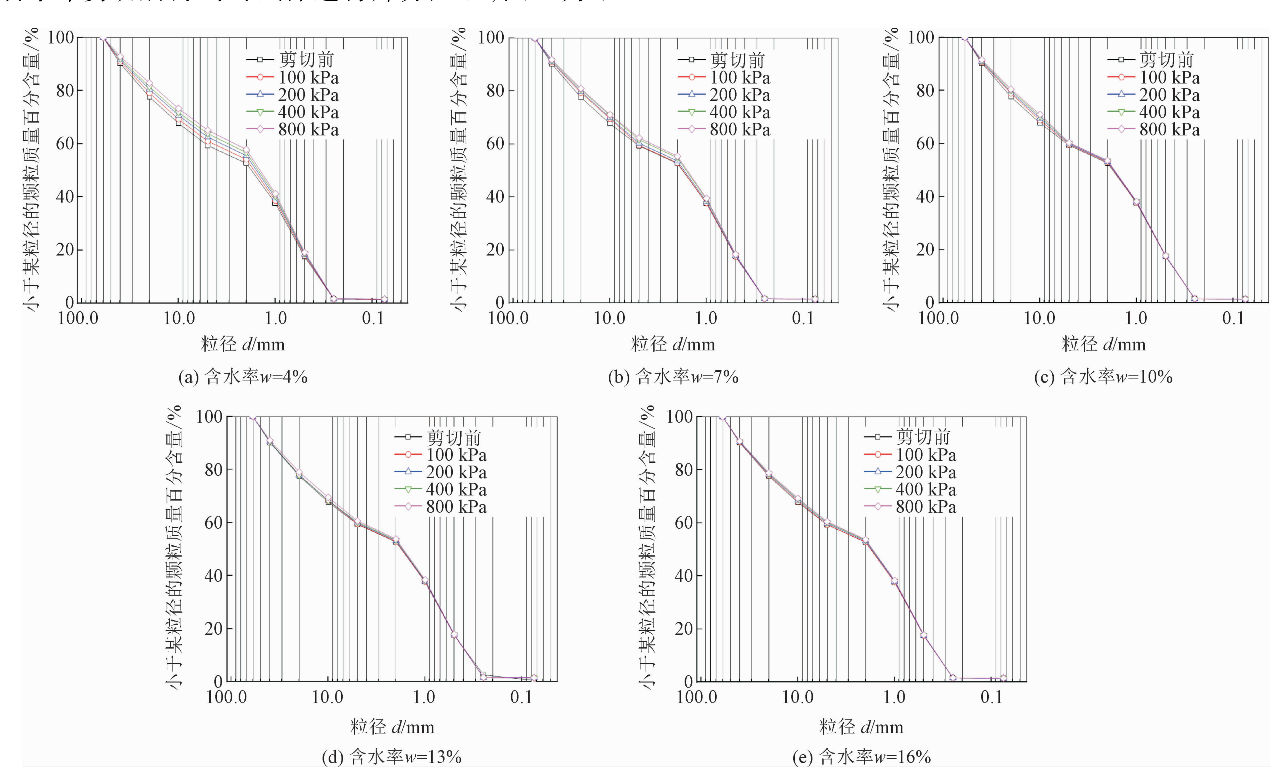


图 8 剪切前后土石混合体级配曲线

Fig. 8 Grading curve of soil-rock mixture before and after shearing

为更为详细地分析各个粒组的变化,绘制围压为 400 kPa、不同含水率下各粒组含量柱状图,如图 9 所示。当围压为 400 kPa 时,相较于剪切前粒组含量,当含水率较低($w = 4\%$)时,各粒组含量变化较大,颗粒破碎主要在 20 ~ 60 mm 粒组中,颗粒含量增加主要是在 0.25 ~ 5 mm 之间,颗粒破碎程度相对于其它含水率较高,含水率 7%、10% 粒组变化也大致呈现相同规律,但其在 5 ~ 10 mm 粒组中颗粒增量变幅出现最大。当含水率较高($w = 16\%$)时,颗粒破碎程度较低,细颗粒粒组变化基本保持不变。

同样地,绘制含水率为 10%、不同围压下各粒组含量柱状图。图 10 为含水率 $w = 10\%$ 各粒组含量柱状图。当含水率为 10% 时,随着围压的增大,颗粒破碎发生于 20 ~ 60 mm 粒组中,在 5 ~ 10 mm 颗粒含量增加相较于其他粒组变幅最大,对于细小颗粒而言,围压对颗粒破碎的影响较为微弱。

表 4　弃渣坝土石混合体剪后筛分结果

Tab. 4　Screening results of rock-soil mixture of waste dam after shear

w/%	σ_3/kPa	不同粒径各粒组含量/%								
		60 ~ 40 mm	40 ~ 20 mm	20 ~ 10 mm	10 ~ 5 mm	5 ~ 2 mm	2 ~ 1 mm	1 ~ 0.5 mm	0.5 ~ 0.2 5mm	<0.25 mm
剪切前		9.76	12.61	9.92	8.38	6.63	15.12	20.12	15.86	1.60
4	100	8.96	11.89	9.91	8.26	6.81	15.54	20.68	16.3	1.65
	200	8.41	11.06	9.81	8.19	6.98	15.94	21.20	16.72	1.69
	400	7.93	10.57	9.71	7.94	7.13	16.27	21.65	17.08	1.72
	800	7.10	9.98	9.63	8.14	7.28	16.60	22.09	17.36	1.82
7	100	9.06	11.51	9.77	10.08	6.65	15.18	20.20	15.91	1.64
	200	8.94	11.19	9.91	9.61	6.74	15.38	20.47	16.08	1.68
	400	8.42	11.05	9.63	9.20	6.89	15.72	20.92	16.47	1.70
	800	8.12	10.90	9.87	8.74	6.97	15.89	21.15	16.57	1.79
10	100	9.34	11.76	10.09	9.14	6.66	15.21	20.23	15.94	1.63
	200	9.11	11.48	9.84	9.63	6.69	15.28	20.33	15.97	1.67
	400	8.79	11.22	9.70	10.02	6.73	15.36	20.44	16.06	1.68
	800	8.44	11.07	9.50	10.42	6.74	15.38	20.54	16.16	1.75
13	100	9.51	12.49	9.74	8.79	6.64	15.16	20.17	15.88	1.62
	200	9.60	12.46	9.60	8.51	6.68	15.25	20.29	15.96	1.65
	400	9.49	12.65	9.55	8.17	6.72	15.33	20.39	16.07	1.63
	800	8.98	11.94	9.56	8.92	6.77	15.44	20.51	16.15	1.73
16	100	9.58	12.46	9.89	8.68	6.63	15.14	20.14	15.87	1.61
	200	9.47	12.23	9.74	8.72	6.68	15.25	20.29	15.98	1.64
	400	9.38	12.03	9.62	8.76	6.72	15.34	20.42	16.11	1.62
	800	9.21	11.93	9.56	8.81	6.76	15.42	20.48	16.13	1.70

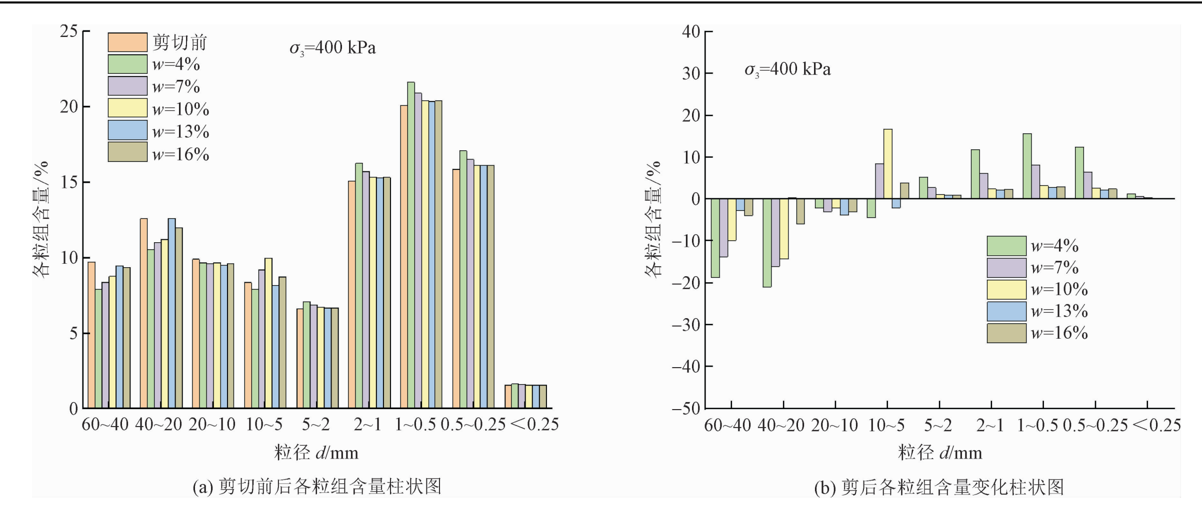


图 9　围压为 400 kPa 各粒组含量柱状图

Fig. 9　Histogram of the content of each particle group with confining pressure of 400 kPa

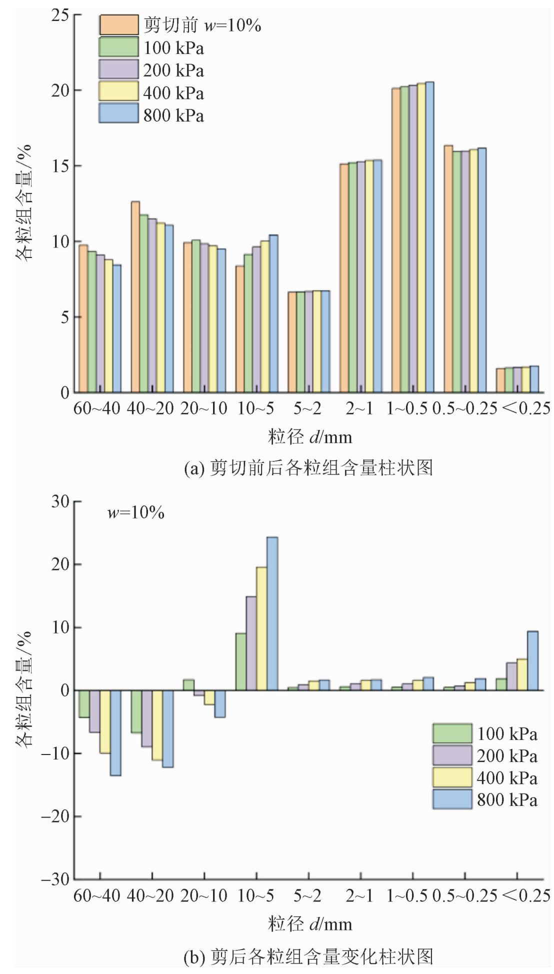


图 10 含水率为 10% 各粒组含量柱状图

Fig. 10 Histogram of the content of each particle group with water content of 10%

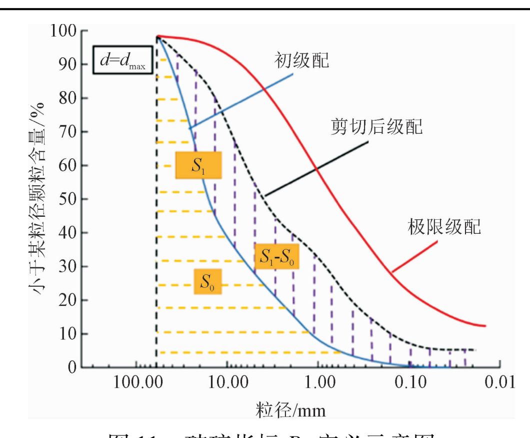


图 11 破碎指标 B_c 定义示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the definition of breakage index B_c

3.2 相关性分析

根据剪切前后颗粒级配的分析,发现剪切后对土石混合体的强度产生较大影响,在颗粒发生压缩破碎后,在这个过程中,土石混合料的结构会发生变化,从而使抗剪强度发生改变。伴随着含水率的不同,颗粒破碎的程度不尽相同,最终的抗剪强度的变化范围不同。结合颗粒破碎、抗剪强度以及含水率 3 方面,通过剪切前后级配差异,引入破碎指标 B_c,对土石混合体颗粒破碎-剪切参数-含水率进行相关性分析。本研究选取破碎指标 B_c 衡量颗粒破碎大小,且

$$B_c = \frac{S_1 - S_0}{S_1} \tag{4}$$

式中,初始级配曲线、试验后的级配曲线与最大粒径 $d = d_{max}$ 所围成的面积分别表示为 S_0 和 S_1,如图 11 所示[22]。

根据定义可知,B_c 的理论取值区间为 0 ~ 1,当 B_c = 0 时表示未破碎,B_c = 1 表示完全破碎且同样反映级配整体的变化,简单实用。

通过图 8 可得出破碎指标 B_c,计算结果如表 5 所示。

表 5 不同工况下破碎指标 B_c (%)

Tab. 5 Breakage index B_c (%) under different working conditions

σ_3/kPa	w/%				
	4	7	10	13	16
100	1.24	1.16	0.77	0.32	0.24
200	2.28	1.49	1.17	0.63	0.52
400	3.07	2.20	1.62	0.90	0.76
800	4.17	2.57	2.03	1.20	1.00

对不同含水率在不同工况下的破碎指标、内摩擦角建立关系,如图 12 所示。由图 12 可知,破碎指标-剪切参数-含水率三者有着密切关系,相互影响,三者建立的关系在图中呈现出较好的趋势。对于低含水率,随着破碎指标的增大,抗剪强度变幅相对较小;含水率增大时,小围压下,颗粒破碎程度较弱,对抗剪强度的主要影响是含水率,抗剪强度减小也是相对较弱。但当含水率增加以及破碎指标增大时,抗剪强度减弱表现出更为强烈的趋势,原因是随着含水率的增加,颗粒之间的水分增加,润滑作用增强,同时,伴随着破碎指标的增大,颗粒破碎更为严重,由于两者的影响,颗粒间的黏聚力、内摩擦力减小,咬合作用减弱,土石混合体本身的抗剪强度减弱;当含水率减小,同时破碎指标也减小时,结果反之。由此可以看出,在这两方面的共同作用下,对建筑物的安全稳定造成更为严重的威胁。通过建立三者关系图能够较好地反映出初始物理状态与颗粒破碎对土石混合体强度特性的影响,对土石混合体强

度分析提供一定的便利和依据。

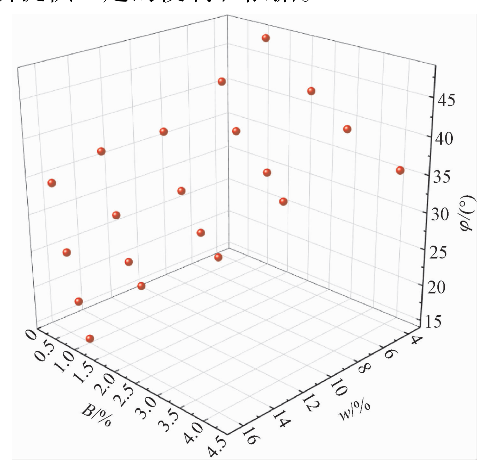


图 12　破碎指标-剪切参数-含水率关系示意图

Fig. 12　Schematic diagram of the relationship between breakage index, shear parameter and water content

4　应力-应变关系模拟分析

对于邓肯-张(E-B)模型反映土石混合体材料应力-应变曲线时，对于低围压拟合程度较好，但随着围压的增大，其拟合度逐渐下降，分析原因主要是，对于高围压其颗粒破碎程度更为严重，发生颗粒破碎时，对于数据的测量影响较大，从而导致拟合度下降。因此，应结合破碎指标对其进行颗粒破碎方面的修正。

4.1　修正邓肯-张(E-B)模型

邓肯-张模型[23]是被广泛应用的双曲线应力-应变关系增量弹性模型，这个模型主要用于描述土壤在受到外部加载时的非弹性行为，特别是在大变形条件下的行为，其参数基于常规三轴试验获取且物理意义明确。其模型根据大量土的三轴试验应力-应变关系曲线，提出可以用双曲线拟合三轴试验的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线，即

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\,\varepsilon_1} \tag{5}$$

$$a = \frac{1}{E_i} \tag{6}$$

$$b = \frac{1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} = \frac{R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \tag{7}$$

$$E_i = K_n P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \tag{8}$$

对于原始邓肯-张模型，在高围压下，适应性不好，分析原因可能为颗粒破碎造成拟合效果较差。考虑颗粒破碎对其相关参数的影响，本研究结合曾凯锋等[24]提出的一个考虑颗粒破碎的邓肯-张模型，运用颗粒破碎指标 B_c 对原始邓肯-张模型进行修正。

基于邓肯-张模型，由于模型中初始剪切模量 E_i 可以通过初始点的斜率来确定，本研究考虑其颗粒破碎从开始到结束整体发生过程，因此，对初始点剪切模量进行分析。前人研究发现颗粒破碎将导致土石混合体的强度降低，压缩性增加，对土石混合料进行了一系列常规三轴试验，修正邓肯-张模型如下关系。

低围压下邓肯-张模型

$$E_i = K_n P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \tag{9}$$

$$a = \frac{1}{E_i} \tag{10}$$

高围压下修正邓肯-张模型

$$E_i' = K_{n1} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n - K_{n2} P_a B_c \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right) \tag{11}$$

$$a = \frac{1}{E_i'} \tag{12}$$

式中，K_{n1}、K_{n2}、n 为试验参数；B_c 为破碎指标；P_a 为大气压强($P_a = 101.3$ kPa，量纲与 σ_3 相同)；E_i' 为修正后的初始剪切模量。

破坏比 R_f 确定方法与邓肯-张模型一致，先分别计算不同围压下应力差极限，然后根据得到轴向应变为 15% 的抗剪强度计算出每组试样的破坏比，最后对不同围压下的破坏比求平均得到破坏比 R_f。模型参数 K_{n1}、K_{n2}、n 的确定，是在不同围压下，通过式(11)对 σ_3、B_c 以及原点处 E_i 进行双变量非线性拟合即可得到，得到修正参数后，代入式(11)中，然后将高围压以及该围压下破碎指标 B_c 带入，求得 E_i'。

4.2　应力-应变关系拟合分析

根据邓肯-张模型，得出 5 组不同含水率在不同围压条件下的初始参数，如表 6 所示。

对于原始与修正邓肯-张模型，将分别绘制 5 组含水率曲线图，具体如图 13 所示，由图 13 可以看出，总体来说在低围压 100、200 kPa 下修正模型曲线、原始模型曲线与试验数据曲线相差不大，原始邓肯-张模型可以较好地反映试验数据，故不对其做出修正。对于高围压 400、800 kPa，5 组含水率工况下，原始模型曲线与试验数据曲线拟合效果较差，不能很好地反映试验数据，本研究提出的修正模型曲线拟合效果有所改善。通过图 13 得到修正前后的相关性系数，结果如表 7 所示。由表 7 可知，相较于原始模型，修正后模型具有更好的相关性，拟合效果较好。

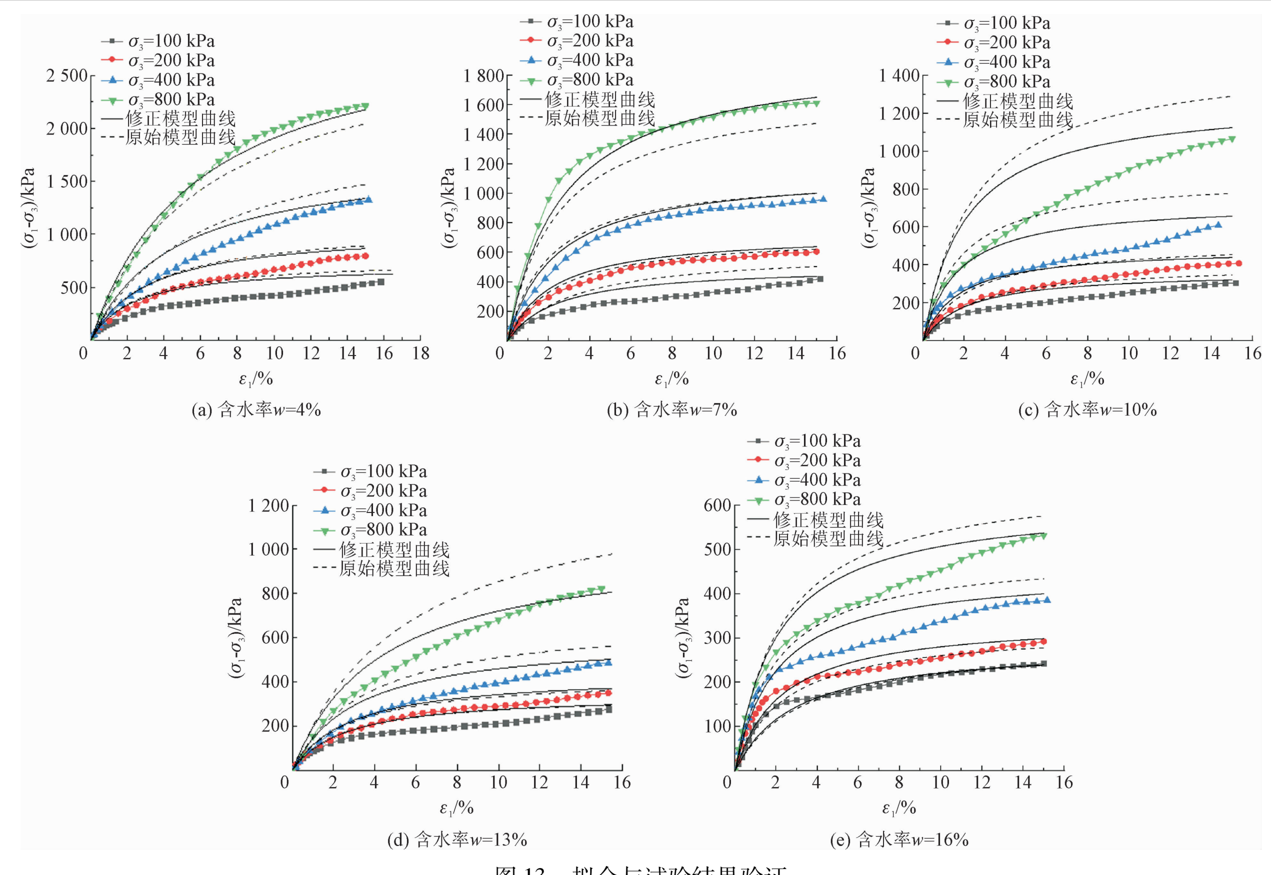


图13 拟合与试验结果验证

Fig. 13 Verification of fitting and test results

表6 邓肯-张模型初始参数

Tab. 6 Initial parameters of Duncan-Chang model

w/%	σ_3/kPa	B_c/%	a	b	R_f	K_{n1}	K_{n2}	n
4	100	1.24	0.003 2	0.001 5	0.73	3.00	−0.06	0.012
	200	2.28	0.003 0	0.001 0				
	400	3.07	0.002 6	0.000 6				
	800	4.17	0.001 9	0.000 4				
7	100	1.16	0.004 7	0.002 0	0.83	2.33	0.19	0.75
	200	1.49	0.003 0	0.001 4				
	400	2.20	0.002 0	0.000 9				
	800	2.57	0.001 4	0.000 5				
10	100	0.77	0.005 7	0.003 0	0.75	2.21	0.59	0.95
	200	1.17	0.003 4	0.002 2				
	400	1.62	0.002 3	0.001 5				
	800	2.03	0.001 6	0.000 9				
13	100	0.32	0.007 5	0.003 3	0.80	1.30	−0.04	0.22
	200	0.63	0.006 3	0.002 6				
	400	0.90	0.005 2	0.001 9				
	800	1.20	0.004 2	0.001 1				
16	100	0.24	0.010 2	0.003 8	0.85	1.17	0.79	0.98
	200	0.52	0.006 6	0.003 1				
	400	0.76	0.004 4	0.002 4				
	800	1.00	0.003 4	0.001 7				

表 7　修正前后相关性系数

Tab. 7　Correlation coefficient before and after correction

w/%	原始模型相关性参数		修正后模型相关性参数	
	400 kPa	800 kPa	400 kPa	800 kPa
4	0.85	0.91	0.89	0.98
7	0.94	0.88	0.96	0.98
10	0.62	0.71	0.72	0.80
13	0.80	0.75	0.84	0.88
16	0.80	0.80	0.92	0.90

不同含水率下的拟合结果与试验结果对比如图 13 所示,拟合程度较好。含水率为 10% 的试样,在前期拟合曲线与试验结果曲线产生偏差,原因可能是土石混合体试样制备不均匀或颗粒不均匀分布,局部颗粒空隙较大,密实性差,导致试样受到较小的应力。

5　结　论

通过对土石混合体的不同含水率在不同试验条件下试验结果进行分析,得到以下结论。

1)在应力-应变曲线上,随着围压增大,抗剪强度增大,围压对土石混合体应力影响较为显著;随着含水率增大,可以明显看出抗剪强度呈现减小趋势,曲线整体呈硬化趋势。

2)对于强度特性,考虑内摩擦角的非线性,随着含水率的增加,抗剪强度逐渐减小,非线性内摩擦角呈现减小的趋势,黏聚力先减小后增大,且伴随着含水率增加,非线性越显著。

3)对于变形特性,随着含水率的增加,相变应力比 M_{pt} 减小,体变量减小;相对应力比 M_{pt} 随着围压 σ_3 的增加而呈现减小的趋势,体变量减小,由剪胀转化为剪缩,出现剪胀滞后的现象。

4)经分析剪切前后颗粒级配变化,随着含水率的增大,抗剪强度减小,剪胀性减弱,颗粒破碎主要发生于大颗粒 20 ~ 60 mm 粒组中,但对细颗粒影响微弱。分析破碎指标-剪切参数-含水率的相关性,三者存在密切关系,更为清晰地展现了这 3 方面对力学特性的影响。

5)修正邓肯-张模型,并验证对土石混合体的适用性,发现拟合程度良好,可以反映出整体的变化规律。

参考文献:

[1]　凌华,殷宗泽. 非饱和土强度随含水量的变化[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(7):1499-1503.
LING Hua,YIN Zongze. Variation of unsaturated soil strength with water contents[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2007,26(7):1499-1503(in Chinese).

[2]　李建中,彭芳乐,龙冈文夫. 不同含水率粘土在不同试验条件下的应力-应变特性[J]. 岩土工程学报,2006,28(3):343-347.
LI Jianzhong,PENG Fangle,TATSUOKA F. Stress-strain behaviour of clay with different water contents under different test conditions[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2006,28(3):343-347(in Chinese).

[3]　陈存礼,张登飞,董玉柱,等. 常含水率三轴条件下非饱和原状黄土的吸力和力学特性[J]. 岩土工程学报,2014,36(7):1195-1202.
CHEN Cunli,ZHANG Dengfei,DONG Yuzhu,et al. Suction and mechanical behaviours of unsaturated intact loess from constant watercontent triaxial tests[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2014,36(7):1195-1202(in Chinese).

[4]　李星,王红雨,陈海全. 坝前淤泥土与新填坝体接触面抗剪强度试验研究及工程应用[J]. 应用力学学报,2021,38(1):166-175.
LI Xing,WANG Hongyu,CHEN Haiquan. Experimental study and engineering application of the shear strength of the interface between silt soil and new fill soil[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(1):166-175(in Chinese).

[5]　许胜才,蔡军,甘彬宏. 水泥土剪胀特性三轴试验与数值模拟验证[J]. 应用力学学报,2023,40(3):643-653.
XU Shengcai,CAI Jun,GAN Binhong. Triaxial test and numerical simulation verification of dilatancy characteristics of cemented soils[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(3):643-653(in Chinese).

[6]　陶庆东,何兆益,贾颖. 基于大三轴试验的土石混合体强度特性与影响因素[J]. 科学技术与工程,2019,19(26):310-318.
TAO Qingdong,HE Zhaoyi,JIA Ying. Strength characteristics and influencing factors of soil-rock mixture based on large triaxial test[J]. Science technology and engineering,2019,19(26):310-318(in Chinese).

[7] 汤华,严松,杨兴洪,等.差异含水率下全风化混合花岗岩抗剪强度与微观结构试验研究[J].岩土力学,2022,43(增刊1):55-66.
TANG Hua,YAN Song,YANG Xinghong,et al. Shear strength and microstructure of completely decomposed migmatitic granite under different water contents[J]. Rock and soil mechanics,2022,43(S1):55-66(in Chinese).

[8] 侯乐乐,翁效林,李林,等.考虑含水率影响的结构性黄土临界状态模型[J].岩土力学,2022,43(3):737-748.
HOU Lele,WENG Xiaolin,LI Lin,et al. A critical state model for structural loess considering water content[J]. Rock and soil mechanics,2022,43(3):737-748(in Chinese).

[9] 蔡国庆,张策,黄哲文,等.含水率对砂质Q3黄土抗剪强度影响的试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(增刊2):32-36.
CAI Guoqing,ZHANG Ce,HUANG Zhewen,et al. Experimental study on influences of moisture content on shear strength of unsaturated loess[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2020,42(S2):32-36(in Chinese).

[10] 苗强强,陈正汉,朱青青.非饱和含黏砂土不排水不排气力学特性三轴试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(增刊1):17-23.
MIAO Qiangqiang,CHEN Zhenghan,ZHU Qingqing. Triaxial tests on mechanical properties of undrained and unvented unsaturated clayey sandy soil[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2022,44(S1):17-23(in Chinese).

[11] 牛庚,孙德安,陈盼,等.南阳重塑非饱和膨胀土的变形和含水率变化特性[J].岩土工程学报,2024,46(2):426-435.
NIU Geng,SUN Dean,CHEN Pan,et al. Variation characteristics of deformation and water content of remolded unsaturated expansive soils in Nanyang[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2024,46(2):426-435(in Chinese).

[12] 谢宝香,高文华,易梅辉,等.红砂岩粗粒料颗粒破碎的分形维数指标及影响因素分析[J].应用力学学报,2022,39(6):1117-1124.
XIE Baoxiang,GAO Wenhua,YI Meihui,et al. Analysis of fractal dimension index and influencing factors of red sandstone coarse granular material breaking[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(6):1117-1124(in Chinese).

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[14] 涂义亮,刘新荣,任青阳,等.含石量和颗粒破碎对土石混合料强度的影响研究[J].岩土力学,2020,41(12):3919-3928.
TU Yiliang,LIU Xinrong,REN Qingyang,et al. Effects of rock contents and particle breakage on strength characteristics of soil-rock aggregate[J]. Rock andsoil mechanics,2020,41(12):3919-3928(in Chinese).

[15] 邓华锋,原先凡,李建林,等.土石混合体直剪试验的破坏特征及抗剪强度取值方法研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):4065-4072.
DENG Huafeng,YUAN Xianfan,LI Jianlin,et al. Research on failure characteristics and determination method for shear strength of earth-rock aggregate in direct shear tests[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2013,32(S2):4065-4072(in Chinese).

[16] 张振平,付晓东,盛谦,等.基于含石量指标的土石混合体非线性破坏强度准则[J].岩石力学与工程学报,2021,40(8):1672-1686.
ZHANG Zhenping,FU Xiaodong,SHENG Qian,et al. A non-linear ultimate strength criterion for soil-rock mixture based on rock block proportion[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2021,40(8):1672-1686(in Chinese).

[17] MARGOLIN G,WAMPOLD B E. Sequential analysis of conflict and accord in distressed and nondistressed marital partners[J]. Journal of consulting and clinical psychology,1981,49(4):554-567.

[18] 吕玺琳,程博文,张甲峰,等.含水率对土石混合料力学特性影响试验研究[J].地基处理,2023,5(2):97-104.
LÜ Xilin,CHENG Bowen,ZHANG Jiafeng,et al. Experimental study on the influence of moisture content on the mechanical properties of soil-rock mixture[J]. Journal of ground improvement,2023,5(2):97-104(in Chinese).

[19] MANZARI M T,DAFALIAS Y F. A critical state two-surface plasticity model for sands[J]. Géotechnique,1997,47(2):255-272.

[20] 石振明,赵晓伟,彭铭.粗粒土大三轴试验研究综述[J].工程地质学报,2014,22(5):792-796.
SHI Zhenming,ZHAO Xiaowei,PENG Ming. Review of studies on large scale triaxial tests of coarse-grained soils[J]. Journal of engineering geology,2014,22(5):792-796(in Chinese).

[21] 刘萌成,孟锋,王洋洋.粗粒料颗粒破碎变化规律大型三轴试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(3):561-567.
LIU Mengcheng,MENG Feng,WANG Yangyang. Evolution of particle crushing of coarse-grained materials in large-scale triaxial tests[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2020,42(3):561-567(in Chinese).

[22] 郭万里,朱俊高,王青龙,等.基于级配方程的粗粒料级配演化预测模型[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(8):2076-2082.
GUO Wanli,ZHU Jungao,WANG Qinglong,et al. Mathematical model based on the gradation equation for predicting gradation evolution of coarse-grained soils[J]. Journal of Central South University(science and technology),2018,49(8):2076-2082(in Chinese).

[23] DUNCAN J M,CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the soil mechanics and foundations division,1970,96(5):1629-1653.

[24] 曾凯锋,刘华北.考虑颗粒破碎的钙质砂修正邓肯-张E-B模型[J].工程地质学报,2020,28(1):94-102.
ZENG Kaifeng,LIU Huabei. A modified Duncan-Chang E-B model with particle breakage for calcareous sand[J]. Journal of engineering geology,2020,28(1):94-102(in Chinese).

(编辑 吕茵)